

МОДУЛЬ ПРОГРАМОВАНОГО ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ

Д. В. Гуменюк^{1, а}, А. О. Охріменко², В. В. Іванова², Г. Є. Монастирський²

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Факультет електроніки

²Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

Анотація

Описано модуль, що є частиною програмно-апаратного комплексу для вимірів температурної залежності вольт-амперної та люмен-амперної характеристики світлодіодів. Модуль складається із програмованого джерела струму, реалізованому на базі мікроконтролера STM32F401RE, ЦАП, схеми струмового дзеркала перетворення напруга – струм, датчика струму і напруги INA226 та ноутбука із середовищем програмування LabVIEW. Широкий діапазон вимірювання струму – від 25 мкА до 800 мА із кроком керування струмом не меншим за 0.4 мкА забезпечується програмно-апаратними засобами, що включають калібрування пристрою, мінімізацію похибки нуля та розширення діапазону вимірювань.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, вимірювання струму, апроксимація вимірювань

1. Вступ

Вольт-амперна (ВАХ) та люмен-амперна (ЛАХ) характеристики є ключовими характеристиками світлодіодів. Як правило, інформація про ВАХ та ЛАХ подається в технічній документації в обмеженому діапазоні напруги, струмів та температурному діапазоні, цікавому для комерційного використання. Між тим, точні ВАХ та ЛАХ, їх температурні залежності для конкретного приладу становить інтерес для наукових та дослідницьких лабораторій, що працюють в сфері фізики напівпровідників, де важливо точно контролювати параметри н/п приладів та вплив на них таких факторів, як температура[1]. Вимірювання параметрів напівпровідникових пристроїв із допомогою аналогових (Л2–54) чи цифрових (серії Л2–6х, Л2–7х чи Л2–8х) приладів не дозволяють візуалізувати характеристики, а характеріографи, засновані на осцилографічному методі побудови ВАХ є дорогими і громіздкими. Для швидкої автоматизованої побудови точної ВАХ та ЛАХ напівпровідникового пристрою ключову роль відіграє програмоване джерело струму, щоб забезпечувало широкий динамічний діапазон та датчики напруги, струму, світлового потоку, що йому відповідають. В даній роботі ставилася за мету розробка автономного та автоматизованого модуля для вимірювання ВАХ та ЛАХ напівпровідникових пристроїв із широким динамічним діапазоном зміни струму за допомогою програмованого джерела струму.

2. Схема установки

Загальна схема програмно-апаратного комплексу для вимірювання ВАХ та ЛАХ світлодіодів в діапазоні температур 20-90°C показана на рис. 1. Основними складовими є теплова комірка в теплоізолюваному корпусі 13 із нагрівальним елементом 4, контролером Arduino Uno R3, модулем програмованого джерела струму та вимірювання ВАХ 11. Світлодіод 1 припаяний до плати 2, яка в свою чергу приєднана гвинтами до радіатора. Контролер Arduino управляє потужністю нагрівального елемента, швидкістю обертання вентилятора, вимірами температури під платою світлодіоду (модуль MAX6675[2]), температури всередині камери (модуль INA219[3]) та світлового потоку (модуль ISL29125[4]). Блок керування тепловою коміркою та PID контролю температури розглядається в окремому дослідженні[5]. Для вимірювання повного світлового потоку світлодіоду 2 та його спектральних складових застосовується датчик освітленості 10, встановлений в кришку тубуса 9 рис. 1, внутрішня поверхня якого зачорнена для забезпечення поглинання неосьової розсіяної частини потоку. Проведені попередньо дослідження встановили, що білі SMD світлодіоди потужністю 1 Вт, з достатньою точністю є ламбертівськими випромінювачами (рис. 1) [6]. Це дозволило підібрати розміри і конфігурацію відповідного вузла вимірювального комплексу таким чином, щоб з одного боку можна виміряти величину повного світлового потоку за освітленістю Е датчика, встановленого нормально на осі тубуса, а з другого тепловий потік від нагрівача і світлодіоду не впливав на роботу датчика.

^аgumenyuk98@gmail.com

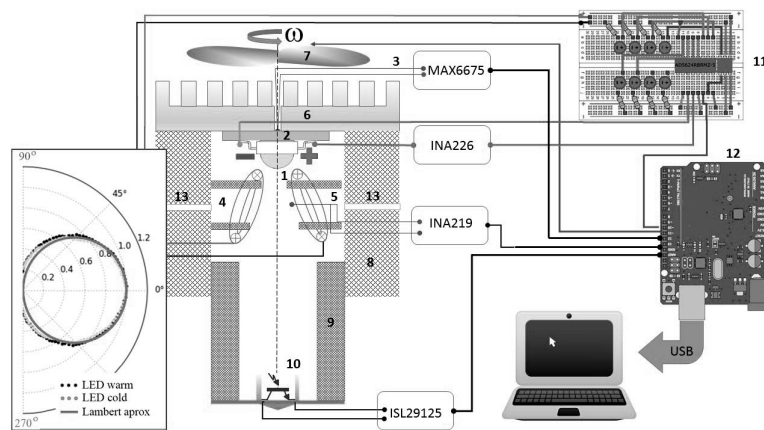


Рис. 1. Схема прототипу програмно-апаратного комплексу для вимірів температурної залежності ВАХ та ЛАХ: 1 – світлодіод; 2 – плата світлодіоду; 3 – термопара ТП1; 4 – нагрівальний елемент; 5 – термістор; 6 – радіатор; 7 – вентилятор; 8 – теплоізоляційний циліндр; 9 – тубус; 10 – світловий датчик; 11 – макетні плати із програмованим джерелом струму, схемою отримання ВАХ світлодіоду та керування потужністю нагріву; 12 – мікроконтролер Arduino Uno R3, 13 – теплоізольована теплова комірка. На вставці експериментальні індикатрисы розсіювання білих світлодіодів та ламбертівська апроксимація

Вимірювання потоку здійснюються в межах малого (≈ 0.002 рад) осьового тілесного кута. Повний світловий потік Φ становить:

$$\Phi = \int_{\Omega} I_0 \cos \theta d\Omega + 2\pi I_0 \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi E R^2, \quad (1)$$

де Ω і θ – відповідно тілесний і лінійний кути, R – відстань між світлодіодом та датчиком. Методика дозволяє співставити дані датчика освітленості величині повного світлового потоку світлодіоду.

Для вимірювання температурної залежності ВАХ та ЛАХ ключовим елементом в схемі є програмоване прецизійне джерело струму, макет і принцип роботи якого проілюстровано на прикладі отримання ВАХ світлодіоду.

3. Макет програмованого джерела струму із схемою отримання ВАХ світлодіоду

Експериментальний макет складається з мікроконтролера STM32F401RE, цифро-аналогового перетворювача AD5624, схеми-перетворення напруга-струм, вимірювача струму і напруги INA226 та ноутбука із середовищем LabVIEW. Блок-схему зображено на рис. 2. Цифровий код подається на вхід ЦАП, що відповідає певному значенню напруги на його виході. Схемою перетворення напруга-струм забезпечується протікання струму крізь досліджуваний зразок, що відповідає напрузі на виході ЦАП. Струм і напруга зразка вимірюються датчиком струму і напруги INA226. Отримані значення передаються на ноутбук, де відбувається їх обробка і візуалізація в середовищі LabVIEW.

3.1. Керування струмом

Цифрове значення напруги від мікроконтролера передається на ЦАП AD5624R по інтерфейсу SPI. AD5624R – 12 бітний чотирьохканальний ЦАП з

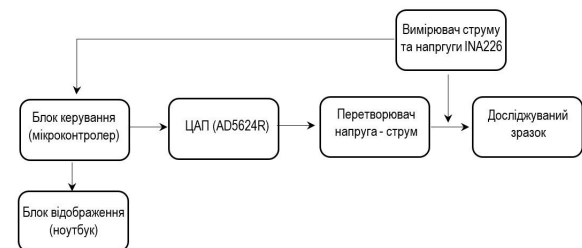


Рис. 2. Блок-схема програмованого джерела струму із схемою отримання ВАХ світлодіоду

вбудованою опорною напругою 2.5 Вольта[7]. Напруга на виході пропорційна коду і в такій конфігурації забезпечується точність керування напругою 1.2 мВ. Для розширення діапазону керованої напруги було одночасно використано два канали ЦАП: С та D. Завдяки схемі грубого керування вихідною напругою з кроком 1.2 мВ, та плавного з кроком 12 мкВ, було досягнуто на два порядки кращої роздільної здатності ЦАП – до 12 мкВ. Плавне налаштування реалізується як програмно, так і апаратно рис. 3. Значення для резисторів R1 та R2 було обрано в 100 кОм і 1 кОм відповідно. Програмно код для вихідного регістру каналу D збільшується до значення 100, що відповідає збільшенню коду для вихідного каналу С на 1.

Значення напруги на виході розраховується за формулою :

$$U = \frac{U_D R_2 + U_C R_1}{R_1 + R_2}, \quad (2)$$

де U_D - напруга на виході каналу точного налаштування, U_C - напруга на виході каналу грубого налаштування.

Схема на рис. 3 була модифікована таким чином, щоб забезпечити компенсацію ненульової вихідної напруги (рис. 4). Вона базується на схемі інвертуючого суматора.

Вихідна напруга може бути обчислена за формулою (використано відношення резисторів $R_4:R_5$ як 1:100):

$$U_o = \frac{U_D R_4}{R_5} + U_C - U \frac{R_8}{R_7} = \frac{U_D}{100} + U_C - U \cdot 0.00044, \quad (3)$$

де U – значення напруги після подільовача на потенціометрі R_6 . Схема налаштовується регулюванням потенціометра R_6 так, щоб при подачі нульового коду на вхід ЦАП, на резисторі R_{13} (рис. 5) встановлювалася нульова напруга. При цьому струм через діод, не перевищував 400 нА, а падіння напруги було декілька десятків мілівольт.

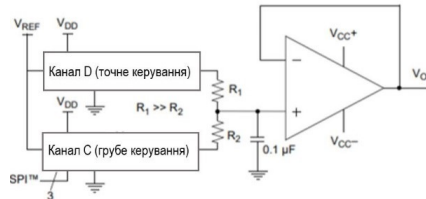


Рис. 3. Схема збільшення розрядності ЦАП

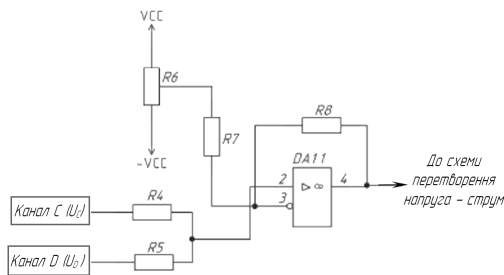
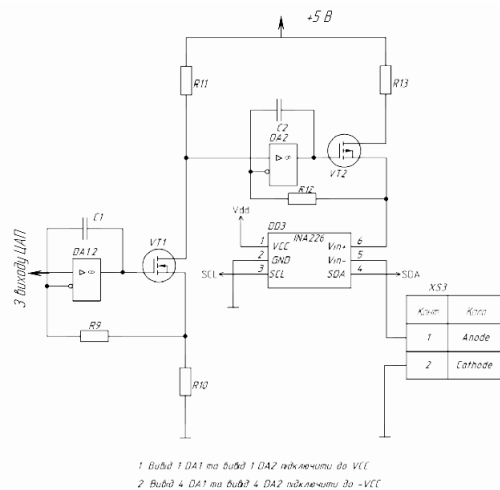


Рис. 4. Схема збільшення розрядності ЦАП і компенсації похибки нульового коду від ЦАП

За основу схеми перетворення напруги була обрана схема, описана в роботі[8]. Частина принципової схеми, що містить перетворювач, зображено на рис. 5. До її складу входять два прецизійні операційні підсилювачі (ОП) DA1 – AD8510, та DA2 – OP97, n-канальний VT1 та p-канальний VT2 польові транзистори із малим струмом витіку та малою пороговою напругою. В схемі використано 2 прецизійні операційні підсилювачі: AD8510 та OP97. Перший має малу напругу зміщення: до 80 мкВ[9], а другий OP97, крім малої напруги зміщення у 10 мкВ[10] має опцію внутрішньої корекції напруги зміщення. Контрольована напруга зміщення забезпечувала мінімальний початковий струм через досліджуваний зразок.

Схема перетворення напруга-струм (рис. 5) являє собою струмове дзеркало, що передає струм з кола транзистора VT1 в коло із навантаженням з коефіцієнтом R_{11}/R_{13} . В ролі навантаження виступає напівпровідниковий пристрій, під'єднаний до клем XS3. Вхідна напруга, що надходить з ЦАП, задає струм через діод. Він обчислюється за формулою:

$$I = \frac{U_{13}}{R_{13}}, \quad (4)$$



4. Калібрування і тестування схеми вимірювання ВАХ

Вимірювання напруги датчиком INA226 забезпечує точність 1.25 мВ, якої цілком достатньо для отримання точної ВАХ. Проте струм INA226 вимірює з роздільною здатністю лише у 25 мкА, що не кореспондується із роздільною здатністю програмованого джерела струму у 0.4мкА. Для штучного поліпшення роздільної здатності було застосовано метод інтерполяції «зверху-вниз». Ідея полягає в калібруванні датчика струму INA226 за допомогою прецизійного приладу в області струмів, доступній для вимірів датчиком (>25 мкА), апроксимації отриманої залежності код-струм лінійною прямою і інтерполяції цієї залежності на малі значення кодів, і відповідно, струмів. Фактично це означає відмову від безпосередніх вимірів струмів менше 25 мкА, натомість зіставлення значень коду інтерпольованим значенням струму.

Для калібрування датчика було проведено серію вимірювань, де значення струму через зразок визначалося за показами INA226 і показами прецизійного мультиметра B7-46. В обох випадках коефіцієнт кореляції становив 99.9%. Покази INA226 було кореговано введенням поправкових коефіцієнтів, які забезпечують збіжність рівняння апроксимованої прямої для показів B7-46 та INA226. Значення струму, виміряні за допомогою INA226, можуть бути визначені за формулою:

$$I' = I \cdot k_1 + k_2, \quad (6)$$

де I' - скориговане значення струму, I – значення струму, виміряне INA226, k_1 та k_2 - поправочні коефіцієнти. Більш детально процес калібрування описано у [12].

Після проведення калібрувальних вимірювань та отримання залежності об'єднаний код-струм, можна використовувати апроксимовані значення струму для побудови ВАХ світлодіодів в «підпороговій області», коли напруга на світлодіоді недостатня для його відкриття, а струми надто малі для вимірів безпосередньо датчиком INA226. Натомість в надпороговій області (робочій області світлодіоду) значення струму і напруги вимірюються безпосередньо. Експериментальні перевірки проводилися на світлодіоді потужністю 1 Вт. Отримана ВАХ світлодіоду за скоригованими значеннями від INA226 наведена на рис. 6. Там же наведено ВАХ, що вимірювалася для світлодіода тієї ж марки вручну. Попри наявність відмінностей, типові особливості ВАХ проявляються на обох зразках. З іншого боку, відмінності в характеристиках зразків однієї марки, проте різних серій, доволі поширена риса напівпровідникових приладів загального користування і тільки підкреслюють актуальність необхідності точного виміру ВАХ конкретного напівпровідникового приладу.

Висновки

Розроблений прототип модулю для вимірювання вольт-амперних характеристик складається з програмованого джерела струму на базі STM32F401RE

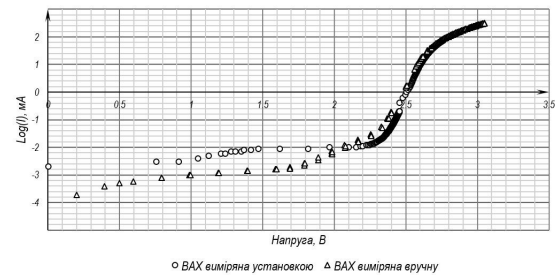


Рис. 6. ВАХ світлодіоду в логарифмічному масштабі, виміряна вручну і за допомогою автоматизованої установки

Nucleo, 12 бітного ЦАП AD5624R, схеми перетворення напруга-струм та датчика INA 226, який вимірює значення напруги і струму зразка та передає їх на ноутбук із програмою в середовищі LabVIEW для обробки і візуалізації даних.

Керування струмом забезпечується за допомогою грубого каналу з кроком 40 мкА та точного каналу з кроком 400 нА. Виміри струму відкаліброваним датчиком INA226 забезпечують визначення ВАХ в робочій області світлодіодів. Для отримання ВАХ в «підпороговій» області можна використовувати інтерпольовані значення струму залежності код – струм, яка має хорошу лінійність (коефіцієнт кореляції 99.9%).

Перелік використаних джерел

1. Кудреватых Е.Ф. Виртуальный измеритель вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов АСС-4211 // Контрольно-измерительные приборы и системы. Разд. Новинки отечественной измерительной техники. — 2002. — № 2.
2. Datasheet MAX6675 (<https://bit.ly/2DdR44H>).
3. Datasheet INA219 (<https://bit.ly/2X78eIy>).
4. Datasheet ISL29125 (<https://bit.ly/2ZdOgO8>).
5. Охріменко А.О. та ін. Модуль керування температурою програмно апаратного комплексу для вимірів температурної залежності ВАХ світлодіодів // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. — 2019.
6. Біляева О.Г., Лосяк М.І., Іванова В.В. Методика визначення світлотехнічних параметрів світлодіодів // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. — 2016. — Т. 1. — С. 28–30.
7. Datasheet AD5624R (<https://bit.ly/2DeBbLj>).
8. C Wells, D Chan. High-Side Voltage-to-Current (V-I) Converter (<https://bit.ly/2CdThws>). — 2013.
9. Datasheet AD851 (<https://bit.ly/2EQIqJo>).
10. Datasheet OP97 (<https://bit.ly/2VT4lGI>).
11. Datasheet INA226 (<https://bit.ly/1Po22S5>).
12. Гуменюк Д.В. Установка для автоматизованого вимірювання вольт-амперних характеристик // Міжнародна науково-технічна XII конференція молодих вчених «Електроніка 2019». — 2019.